

MODELLING RHEOLOGY OF ALLOYS SUBJECT TO RELAXATION PROCESSES

¹ А.С. Смирнов, ¹ А.В. Коновалов, ¹ О.Ю. Муйземнек,

² В.Г. Пушин, ² А.Н. Уксуников

¹Институт машиноведения УрО РАН, Екатеринбург, Россия

²Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург, Россия

Abstract

In this article the method for the identification of the rheological model of strain resistance is proposed. This method uses experimental data on the strain resistance and the volume fraction of dynamic recrystallization is determined by method of electron backscattered diffraction. The method was tested on the example of alloy AMg6 at 300 °C and gives acceptable results for engineering calculations on the description of strain resistance curve and prediction of the volume fraction of the passed dynamic recrystallization in the alloy.

Металлы и сплавы в процессе пластической деформации при температурах 0,6–0,8 от температуры плавления обладают сложной реологией, обусловленной одновременным проявлением процессов упрочнения за счет образования и роста количества дислокаций и разупрочнения вследствие возврата и рекристаллизации. Ранее была построена иерархическая математическая модель сопротивления деформации с внутренними переменными, кинетические уравнения для которых, заданные с точностью до числовых параметров, описывают данные процессы. Поскольку в модель входят две макроскопические величины: сопротивление деформации и объемная доля динамически рекристаллизованных зерен в сплаве, то практика идентификации модели показала, что близость экспериментальной и расчетной кривых сопротивления деформации не всегда обеспечивает близость соответствующих значений объемной доли динамически рекристаллизованных зерен.

Целью данной работы является дальнейшее развитие методики идентификации реологической модели сопротивления деформации на основе экспериментальной информации как о сопротивлении деформации, так и об объемной доле динамически рекристаллизованных зерен.

Материал и методика исследования

Из прутка сплава АМг6 (Al – 92,4; Mg – 6,56; Fe – 0,27; Si – 0,16; Cu – 0,013; Mn – 0,05; Ti – 0,04; Zn – 0,02; Be – 0,0012%) диаметром 10 мм были выточены цилиндрические образцы диаметром 8±0,1 мм и высотой 12±0,1 мм, которые сжимали на кулачковом пластометре центра коллективного пользования "Пластометрия" ИМАШ УрО РАН при температуре 300°C. опыты проводили с применением графита в качестве смазки.

Комбинированная погрешность по измерению силы сжатия не превышала ±100 Н, а по перемещению деформирующего ползуна пластометра не превышала ±10 мкм.

Модель сопротивления деформации

Модель сопротивления деформации σ_s имеет вид:

$$\sigma_s = \sqrt{3}k + \frac{\sqrt{3}}{2}q, \quad (1)$$

$$\dot{k} = \dot{\rho}V_n - \rho\dot{V}_r, \quad (2)$$

$$\dot{\rho} = a_1 \exp(-a_2\rho)\dot{\epsilon} - a_3\rho, \quad (2)$$

$$\dot{V}_r = \begin{cases} a_5\epsilon_r R^2 \frac{dR}{dt}, & \text{если } V_r \leq a_6, \\ \dot{V}_r^* \left(\frac{1-V_r}{1-a_6} \right)^{a_7}, & \text{если } V_r > a_6, \\ \dot{V}_r^* = \dot{V}_r, & \text{при } V_r = a_6 \end{cases} \quad (3)$$

$$\epsilon_r = \int_0^{t_r} \dot{\epsilon} dt, \quad (4)$$

$$\frac{dR}{dt} = \dot{\rho}, \quad (5)$$

$$q = a_8 \ln(1 + a_9\dot{\epsilon}). \quad (6)$$

Здесь k – напряжение текучести в законе пластического течения Мизеса, $k = a_0$ в начальный момент пластической деформации; q – функция, описывающая вязкие свойства сплава; $\dot{\epsilon}$ – скорость деформации; ρ – величина, пропорциональная приращению плотности дислокаций в результате пластической деформации; ϵ_r – степень деформации до начала динамической рекристаллизации; V_n , V_r – нерекристаллизованная и динамически рекристаллизованная доли объема металла соответственно, $V_n + V_r = 1$; R – радиус рекристаллизованного зерна, $R(t_r) = 0$, t_r – момент времени начала динамической рекристаллизации, определяемый условием $\rho = a_4; a_i$ ($i=0, \dots, 9$) – параметры модели, подлежащие идентификации по экспериментальным данным. Точкой сверху обозначена производная по времени t .

Определение объемной доли динамически рекристаллизованных зерен

В настоящей работе изображения микроструктуры образцов были получены методом дифракции обратнорассеянных электронов (ДОРЭ) на растровом электронном микроскопе MIRA 3 TESCAN с приставкой для анализа ДОРЭ OXFORD HKL Nordlys F+ и обработкой информации программой HKL Channel 5. Также метод ДОРЭ применяли для определения пройденной объемной доли динамической рекристаллизации по следующему алгоритму:

1) внутри каждого зерна вычисляется средний угол разориентации решетки Θ_c ;

2) перебором определяется критический угол разориентации Θ_{\max} , при котором, если $\Theta_c > \Theta_{\max}$, то зерно деформированное, а если $\Theta_c \leq \Theta_{\max}$ – рекристаллизованное;

3) экспериментально определенная объемная доля V_d динамически рекристаллизованных зерен рассчитывается как отношение суммарной площади рекристаллизованных зерен к общей площади зерен.

На рис. 1 приведен пример определения рекристаллизованных и деформированных зерен для расчета объемной доли динамической рекристаллизации по выше описанному алгоритму. Здесь и на остальных рисунках черные точки внутри зерен означают неопределенность в кристаллографическом направлении. В основном они соответствуют интерметаллидам в материале.

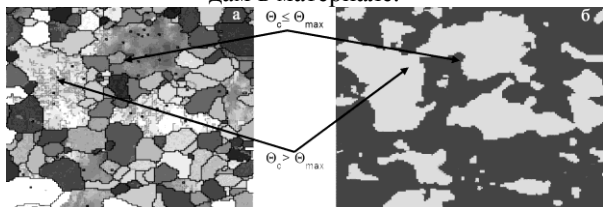
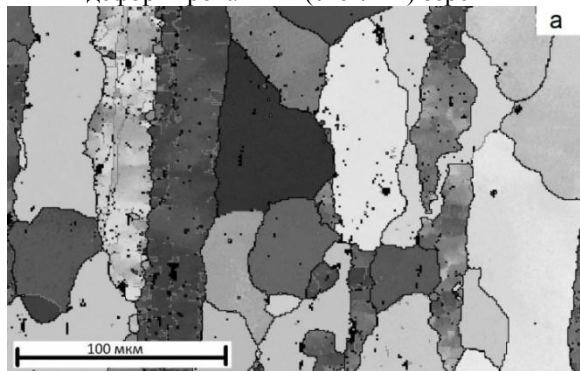


Рис. 1. Пример определения рекристаллизованных и деформированных зерен:

- а - реконструированная микроструктура образца;
- б – карта рекристаллизованных (темный) и деформированных (светлый) зерен



Несмотря на применение смазки на торцах сжимаемых образцов избежать сил трения не удается. Это приводит к неоднородности деформации в объеме образца. В связи с этим, методом ДОРЭ получали изображения микроструктуры образца до деформации в центре образца и после деформации в трех его зонах, которые показаны на рис. 2. Следует отметить, что зона III соответствует переходу свободной поверхности образца в область контакта с бойком.

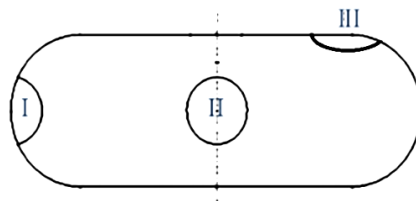


Рис. 2. Три зоны исследования микроструктуры образца после деформации

На рис. 3 в качестве примера приведены полученные изображения микроструктуры с шагом сканирования 300 нм. Здесь высокоугловые границы изображены черным цветом, а малоугловые границы – серым.

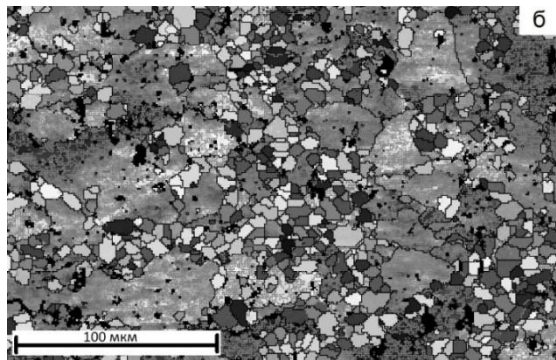
Идентификация модели сопротивления деформации

В модель (1) – (6) входят 10 неизвестных параметров a_i , значения которых подлежат определению по результатам экспериментов. В ранних работах авторов значения этих параметров находили, минимизируя следующую меру отклонения опытных и расчетных значений сопротивления деформации

$$J(a_0, \dots, a_9) = \sum_{j=1}^N \int_0^{T_j} [\sigma_s^j(t) - z^j(t)]^2 dt \rightarrow \min. \quad (7)$$

Здесь j – номер эксперимента, N – количество экспериментов, T_j – время деформации

образца в j -м эксперименте, σ_s^j, z^j – рассчитанная по модели (1) – (6) и полученная в опыте функция сопротивления деформации, соответственно.



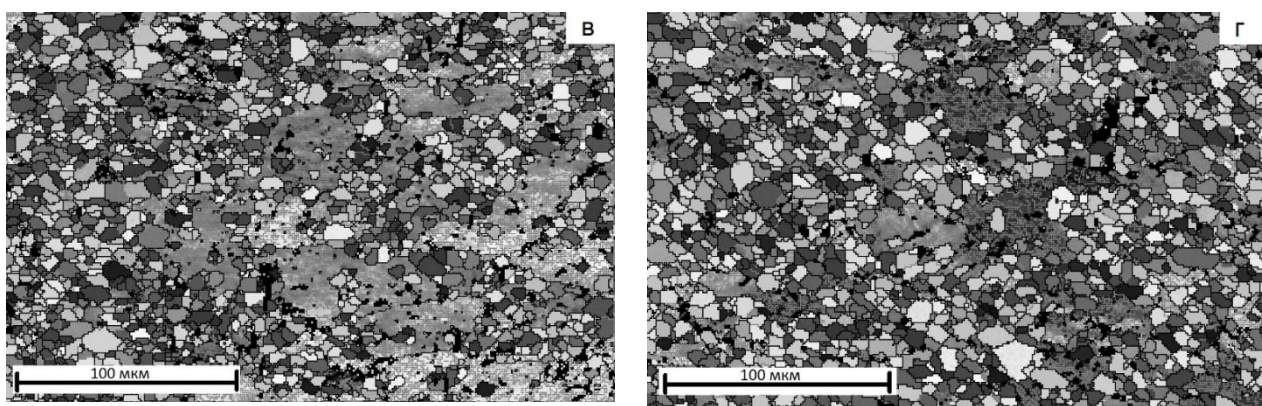


Рис.3. Изображение микроструктуры образца перед деформацией (а) и после деформации в зоне I (б), II (в) и III (г)

Неоднородность деформации образца при определении сопротивления деформации учитывали с помощью итерационной процедуры, использующей конечно-элементное моделирование процесса сжатия цилиндрического образца плоскими плитами и описанной в работе [1]. Для идентификации коэффициентов модели использовали экспериментальные данные, которые показаны на рис.4.

Полученные коэффициенты модели сопротивления деформации по этой методике с использованием меры отклонения (7) приведены в первой строке табл. 1. По этим коэффициентам при помо-

щи конечно-элементного моделирования были рассчитаны зависимости изменения скорости деформации $\dot{\epsilon}$ от времени t в трех зонах образца (рис. 5), в которых ранее были получены изображения микроструктуры с помощью метода ДОРЭ. Для этих зон в табл. 2 приведены рассчитанные значения степени деформации ϵ и экспериментальноопределенные значения объёмной доли динамической рекристаллизации V_d .

1. Коэффициенты модели сопротивления деформации

№ формулы	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	a_9
7	56	2394	0.049	0.021	5.19	0.019	0.085	0.18	11.6	348
8	56	12763	0.046	4.765	5.08	0.018	0.074	1.64	11.2	347

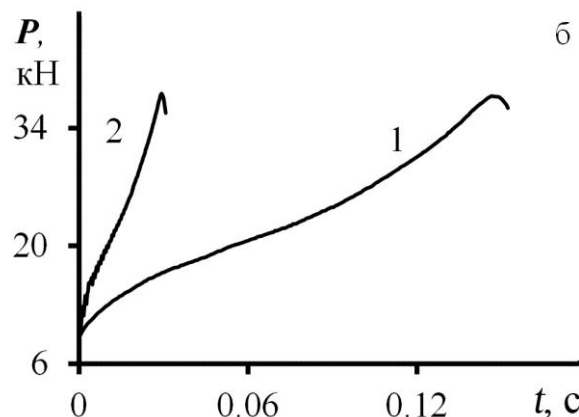
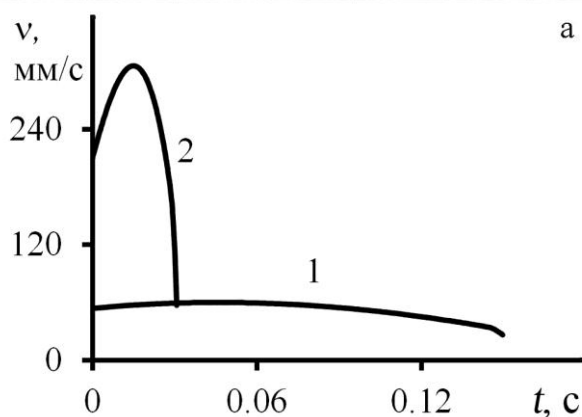


Рис. 4. Зависимость скорости изменения высоты образца v (а) и силы деформации образца P (б) от времени t , используемые при идентификации коэффициентов модели сопротивления деформации [3]. Одинаковыми цифрами обозначены данные одного и того же эксперимента

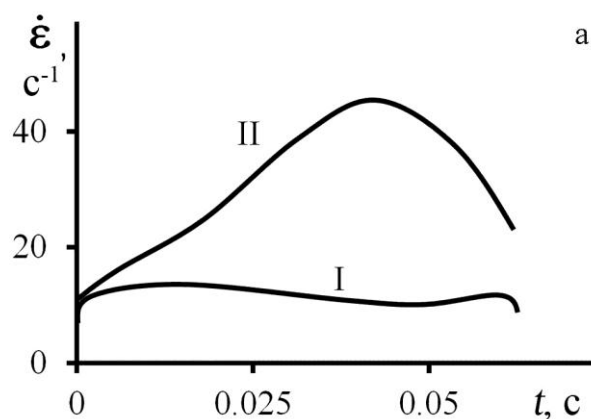


Рис. 5. Зависимость скорости деформации $\dot{\epsilon}$ от времени t в трех зонах образца

Полученные на основе минимизации функции (7) значения параметров модели a_i обеспечивали близость экспериментальных и расчетных кривых силы сжатия образцов. Однако имело место значительное отклонение расчетных данных объемной доли динамически рекристаллизованных зерен от экспериментальных. Так среднее относительное отклонение рассчитанной объемной доли динамической рекристаллизации δ_v для совокупности зон I и II составило 71%, а для зоны III– 45%.

2. Экспериментально определенная объемная доля динамически рекристаллизованных зерен V_9 в зависимости от накопленной степени деформации ϵ

№ зоны	ϵ	V_9
I	0.73	0.39
II	1.90	0.56
III	3.28	0.76

Исходя из полученных данных, можно заключить, что модель (1)–(6), идентифицированная по функции цели (7), приемлемо описывает кривую сопротивления деформации, однако для предсказания количественных характеристик пройденной динамической рекристаллизации полученные коэффициенты использовать нельзя. С целью устранения этой проблемы провели коррекцию ранее полученных коэффициентов по функции (8):

$$\Phi(a_0, \dots, a_9) = \sum_{j=1}^N \int_0^{T_j} [\sigma_s^j(t) - q^j(t)]^2 dt + \sum_{n=1}^M [V_r^n(T_n) - V_9^n(T_n)]^2 \rightarrow \min. \quad (8)$$

Здесь q^j – сопротивление деформации, рассчитанное по коэффициентам из первой строчки табл.1. Второе слагаемое в функции (8) является мерой отклонения расчетных значений V_r^n объемной доли динамически рекристаллизованных зерен от экспериментальных значений V_9^n , T_n – момент времени окончания деформации n -го эксперимента.

Коррекцию коэффициентов модели проводили следующим образом. Сначала построили кривые сопротивления деформации по модели (1)–(6) с коэффициентами из первой строки табл.1. В качестве экспериментальных данных использовали те же данные, что и при выполнении алгоритма учета неоднородности напряженно-деформированного состояния образца в эксперименте. Построенные кривые сопротивления деформации зафиксировали и по ним минимизировали для модели (1)–(6) функцию (8), которая учитывает отклонение расчетной объемной доли динамической рекристаллизации V_r^n от экспериментально определенной V_9^n .

Прим этом использовали ранее рассчитанные зависимости $\dot{\epsilon} - t$ для зон I и II (см. рис. 5,а), для которых методом ДОРЭ была определена объемная доля V_9 динамически рекристаллизованных зерен (см. табл. 2). Полученные коэффициенты модели приведены во второй строке табл. 1.

После идентификации модели (1) – (6) с использованием функции (8) выполнили моделирование сжатия образцов методом конечных элементов по экспериментальным зависимостям, приведенным на рис. 4. В результате оказалось, что среднее относительное отклонение δ_p экспериментальной кривой силы сжатия от результатов моделирования составило 2,6%, что не намного хуже, чем при идентификации с использованием функции (7), которое составило 1,3%. Однако отклонение объемной доли динамической рекристаллизации δ_v для I и II зоны значительно уменьшилось и составило 6,5%.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант №13-08-00989_a) и программы № 11 ОЭМ-МПУ РАН (проект 12-Т-1-1007).